第39卷 第1期
2022年1月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 1
Jan. 2022

新疆生态脆弱性时空演变及驱动力分析

孙桂丽[1,2]， 陆海燕[1]， 郑佳翔[1]， 刘燕燕[1]， 冉亚军[1]

（1. 新疆农业大学林学与风景园林学院，新疆 乌鲁木齐 830052；
2. 干旱区林业生态与产业技术重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830052）

摘 要：生态脆弱性评价是了解区域生态状况的重要途径，科学评估生态脆弱性等级及变化对区域生态保护与建设，实现区域可持续发展具有重要意义。研究利用SRP模型构建新疆生态脆弱性评价指标体系，结合空间主成分分析方法构建生态脆弱性指数评价模型，分析新疆生态脆弱性时空演变特征。结果表明：(1) 2000—2018年，新疆生态敏感性整体为中度敏感，呈现东南高西北低，主要受景观破碎度和土壤侵蚀程度影响；生态恢复力受植被覆盖度影响较大，整体呈西北高、东南低，变化幅度小，恢复力较弱；生态压力大致呈南、北部的山区和中部绿洲区、山区高、东南低，主要影响因子是人均GDP、农业依赖度和人口密度。(2) 2000—2018年新疆生态脆弱性整体处于中度脆弱到重度脆弱。南、北部植被覆盖度低的地区生态脆弱等级较高，中部高海拔林草丰富地区生态脆弱性等级相对较低；2000—2018年新疆生态脆弱性综合指数呈现先增长后降低趋势。(3) 生态脆弱性主要驱动力方面，人为活动因子的农业依赖度、人口密度、土地垦殖率，自然环境因子的生境质量指数、景观破碎度、景观恢复力指数和年均降水量7个指标是新疆2000—2018年生态脆弱性变化的主要单因子；生境质量指数、景观恢复力指数、景观破碎度指数、植被覆盖率的变化与区域人类活动的相互作用是促使新疆生态脆弱性的主要驱动力。

关键词：SRP模型；生态脆弱性；时空分布；驱动力；新疆

量化区域生态的脆弱性并进行定量分级，有利于因地制宜的开展生态保护和生态恢复。Turvey[1]和Mahapatra等[2]运用综合指数法、层次分析法计算沿海综合脆弱性指数，曹诗颂等[3]以敏感性-恢复力-压力度(SRP)模型为基础，探讨了生态脆弱性耦合经济贫困的协调度，王贝贝等[4]使用SRP概念模型构建南昌市生态环境脆弱性评价指标体系，对南昌市生态环境脆弱性的时空分布特征和驱动力进行分析。有关新疆生态脆弱性的整体、综合研究较少，王让会等[5]通过构建塔河流域生态脆弱性指数来客观反映了塔河流域生态环境改善质量的重要性和优劣；谢霞等[6]用综合湿地生态脆弱度评估模型对艾比湖区域的湿地生态脆弱性状况进行了综合评估；万洪秀等[7]对博斯腾湖湿地的生态脆弱情况进行综合评价。

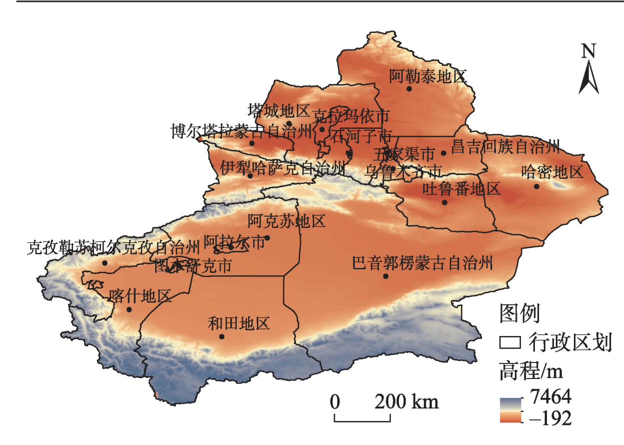
新疆地处亚欧大陆腹地，山盆相间，地貌类型复杂多样，有14个地州市[8](图1)，生态系统稳定性差、抗逆性弱，是我国西北典型的生态脆弱区[8-9]，而其作为丝绸之路经济带的核心区，其生态状况的变化会直接影响社会和经济的可持续发展[10-11]。因此，本研究基于生态敏感性-生态恢复力-生态压力度的SRP模型结合新疆生态环境特点构建评价指标体系，建立多源空间数据叠加的新疆生态脆弱性评价模型，定量分析不同阶段生态脆弱性等级分布和变化，科学把握生态脆弱性的演变过程，分析其驱动力，为新疆"生态功能区划"和"国土主体功能区划"的更好实施提供科学依据，保障区域生态环境可持续发展。

1 数据来源

主要采用了新疆土地利用数据、数字高程模型数据(DEM)、气象数据、社会经济统计数据、归一化植被指数(NDVI)、干燥度和土壤侵蚀数据，数据来源与处理如表1所示。

利用Fragstats 4.2景观格局分析软件，从新疆土

收稿日期：2020-12-21； **修订日期：**2021-02-16
基金项目：国家自然科学基金(41861046)；2021"三区人才"项目(2221-LYE1)
作者简介：孙桂丽(1979-)，教授，从事生态风险评估与生态恢复方面的研究. E-mail: sxfgl@126.com



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2019)3333号，底图边界无修改。下同。

图1　研究区位置示意图

Fig. 1　Location of the research area map

地利用类型数据中提取景观格局指数，构建景观恢复力指数。选用极差法对原始数据进行标准化，方法参见文献[12-13]。根据马骏等[13-15]的研究结果，利用分等级赋值法将土壤侵蚀程度划分为微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀、强度侵蚀和极强度侵蚀5个等级，分别赋值为2、4、6、8、10。

2　研究方法

通过计算生境质量指数来反映生态环境状况；为消除指标信息中的重叠和共线性，对标准化后的空间栅格数据采用空间主成分分析方法(SPCA)[16-17]计算SRP模型的生态敏感性、生态恢复力和生态压力度指标权重。同时，对新疆2000年、2005年、2010年、2015年和2018年的生态脆弱性进行主成分分析，5期数据均选取累积贡献率大于85%的前k个主成分，构建新疆生态脆弱性指数模型，具体计算公式[14]见表2。

2.1　指标体系的构建

(1) 生态敏感性指生态环境在受到作用力干扰时的敏感状况，反映区域生态在受到内部和外部影响时所发生的一系列状态反映[4,12]，主要包括地形、地貌、气象等自然环境因素。选取高程、坡度、地形起伏度等因子反映地形地貌特征；土地垦殖率反映土地资源开发利用程度[12]；选择景观破碎度、土壤侵蚀程度反映土地利用状况和水土流失特征[16-18]；选用干燥度、年均降水量、≥10 ℃积温等指标反映气候特征变化[14]。

(2) 生态恢复力指生态环境受到外力干扰时的自我恢复能力，与生态系统的内部结构关系密切[17-19]。新疆位于温带大陆性气候区，荒漠面积大，选取植被覆盖度指标和景观恢复性指数来反映生态恢复能力；选取生境质量指数反映生境的抗干扰能力和缓冲能力。

(3) 生态压力度指生态环境受到外部干扰时所产生的生态效应，主要受社会经济发展情况和人类活动的影响[17,20]。不合理的人类活动会产生许多生态问题，故选取人口密度、人均耕地面积反映人类活动强度对生态环境的影响；选取农业依赖度反映农业活动对生态环境的影响；选取人均GDP和第二产业比重反映经济发展以及经济活动对生态环境

表1　数据来源与处理方法

Tab. 1　Data source and processing method

数据名称	数据来源	数据处理
DEM数据	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)，分辨率为30 m	选取的地形因子主要包括高程、坡度、地形起伏度等因子，采用ArcGIS 10.2的Spatial Analyst模块的Slope和Surface Analysis工具对新疆DEM影像计算坡度和地形起伏度。
年平均降水量 ≥10 ℃积温栅格数据	中国气象数据网(http://data.cma.cn/)	选取新疆37个国家一般气象站每月气象数据，温度和降水数据以月为尺度的点数据，时间周期为2000年、2005年、2010年、2015年和2018年，采用反距离权重法对月气象点数据进行插值，得到5期共60个月的气象因子栅格数据。
人口密度 人均GDP 人均耕地面积 第二产业比重	《中国统计年鉴》(2001—2019)、《新疆统计年鉴》(2001—2019)、新疆国民经济和社会发展统计公报[11]	通过统计年鉴、国民经济和社会发展统计公报，统计整理得到新疆各地州的社会经济指标数据，采用反距离权重法进行插值，得到2000年、2005年、2010年、2015年和2018年5期的社会经济栅格数据。
归一化植被指数(NDVI) 土地利用数据 干燥度 土壤侵蚀数据	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)，分辨率为30 m	通过像元二分模型和栅格计算器计算研究区归一化植被指数。 所有空间数据统一重采样为1 km×1 km，为保证采用的指标具有良好的空间重合性，所有栅格数据均统一到同一投影和坐标系(Albers地图投影和Krasovsky-1940坐标系)。

表2 SRP模型相关计算公式及参数说明

Tab. 2 Calculation formula and parameter description of SRP model

指标名称	计算公式	参数说明
生境质量指数	$E=A_{bio}\times\left(\frac{\sum_{i=1}^{6}\beta_i\times M_i}{Z}\right)$	A_{bio} 为生境质量归一化系数(参考值为511.26);β_i 为第i类土地利用类型权重(林地0.35,草地0.21;水域0.28;耕地0.11;建设用地0.04;未利用地0.01);M_i 为区域内第i类土地利用类型面积;Z 为各地州市总面积。
生态敏感性	$S=\sum_{i=1}^{n}W_1S_i$	S为生态敏感性;W_1生态敏感性的权重;S_i生态敏感性指标值。
生态恢复力	$R=\sum_{i=1}^{n}W_2R_i$	R为生态恢复力;W_2生态恢复力的权重;R_i生态恢复力指标值。
生态压力度	$P=\sum_{i=1}^{n}W_3SP_i$	P为生态压力度;W_3生态压力度的权重;P_i生态压力度指标值。
生态脆弱性指数	$EVI_n=x_1PC1_n+x_2PC2_n+x_3PC3_n+x_4PC4_n+x_5PC5_n+,\cdots,+x_kPCk_n$	EVI_n为某一年的生态脆弱性指数,其值越大生态环境越脆弱,生态系统受到的破坏程度越明显;$x_1, x_2, \cdots, x_k$为对应指标权重;PC1, PC2, …, PCk为累积贡献率大于85%的前k个主成分,n为年份。
生态脆弱性综合指数	$EVSI=\sum_{i=1}^{n}P_i\frac{A_i}{s}$	EVSI为生态脆弱性综合指数;P_i 为第i类脆弱性等级值,微度脆弱、轻度脆弱、中度脆弱、强度脆弱和重度脆弱的P值分别为1、2、3、4、5;A_i 为第i类脆弱性面积;s为区域总面积。

的影响。

从生态敏感性、生态恢复力和生态压力度3个维度,综合人为因素和自然因素,选取17个指标构建生态脆弱性评价指标体系,以通过多个单因子对新疆2000—2018年的生态脆弱性进行综合评价。用正向指标和负向指标来表示指标对生态环境脆弱性的影响(表3)。

通过主成分分析计算得出2000年、2005年、2010年、2015年和2018年前6个主成分的累积贡献率分别为90.34%、90.44%、90.36%、89.94%和88.00%,均大于85%(表4),满足主成分的选取要求[21]。新疆2000—2018年生态脆弱性指数EVI的计算表达式如下:

$$EVI_{2000}=0.378PC1_{2000}+0.231PC2_{2000}+0.144PC3_{2000}+0.063PC4_{2000}+0.051PC5_{2000}+0.038PC6_{2000}$$

表3 基于SRP模型的新疆生态脆弱性评价指标体系

Tab. 3 Ecological vulnerability assessment index system in Xinjiang based on SRP model

总目标层	子目标层	准则层	指标层	属性
新疆生态脆弱性指数	生态敏感性	地形因子	高程	+
			坡度	+
			地形起伏度	+
		地表因子	土地垦殖率	+
			景观破碎度	+
			土壤侵蚀程度	+
		气象因子	干燥度	+
			年均降水量	−
			≥10 ℃积温	−
	生态恢复力	植被因子	植被覆盖度	−
			景观恢复力指数	−
			生境质量指数	−
	生态压力度	社会因子	人口密度	+
			农业依赖度	+
			人均GDP	+
			人均耕地面积	+
			第二产业比重	+

注:“+/−”分别表示正向指标和负向指标。

表4　2000—2018年新疆生态脆弱性指标主成分分析结果

Tab. 4　Principal component analysis results in Xinjiang from 2000 to 2018

主成分	2000年			2005年			2010年			2015年			2018年		
	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	0.17	37.79	37.79	0.18	38.67	38.67	0.16	37.06	37.06	0.16	37.39	37.39	0.17	36.04	36.04
2	0.10	23.07	60.86	0.11	22.73	61.39	0.10	23.18	60.25	0.10	23.02	60.40	0.10	20.62	56.65
3	0.06	14.37	75.23	0.06	12.77	74.17	0.07	15.61	75.85	0.05	12.58	72.98	0.06	11.73	68.38
4	0.03	6.29	81.52	0.03	6.66	80.83	0.03	6.34	82.19	0.03	6.70	79.68	0.04	8.38	76.76
5	0.02	5.05	86.57	0.03	5.57	86.40	0.02	4.89	87.08	0.03	6.16	85.84	0.03	6.29	83.05
6	0.02	3.77	90.34	0.02	4.05	90.44	0.01	3.28	90.36	0.02	4.10	89.94	0.02	4.95	88.00
7	0.01	2.72	93.06	0.01	2.98	93.42	0.01	2.75	93.11	0.02	3.68	93.63	0.02	4.25	92.25
8	0.01	2.27	95.33	0.01	2.49	95.91	0.01	2.36	95.47	0.01	2.06	95.69	0.02	3.23	95.48
9	0.01	1.37	96.70	0.01	1.40	97.31	0.01	1.46	96.93	0.01	1.49	97.18	0.01	1.35	96.83
10	0.01	1.12	97.81	0.01	1.21	98.52	0.00	1.08	98.01	0.00	1.06	98.24	0.01	1.26	98.09
11	0.00	0.78	98.59	0.00	0.47	98.99	0.00	0.65	98.67	0.00	0.53	98.76	0.00	0.88	98.97
12	0.00	0.63	99.22	0.00	0.30	99.29	0.00	0.41	99.07	0.00	0.34	99.10	0.00	0.37	99.34
13	0.00	0.25	99.47	0.00	0.26	99.55	0.00	0.34	99.42	0.00	0.31	99.42	0.00	0.28	99.61
14	0.00	0.24	99.71	0.00	0.22	99.77	0.00	0.24	99.66	0.00	0.28	99.70	0.00	0.21	99.82
15	0.00	0.21	99.91	0.00	0.16	99.93	0.00	0.20	99.86	0.00	0.13	99.83	0.00	0.11	99.93
16	0.00	0.05	99.96	0.00	0.05	99.98	0.00	0.09	99.95	0.00	0.12	99.95	0.00	0.05	99.98
17	0.00	0.04	100	0.00	0.02	100	0.00	0.05	100	0.00	0.05	100	0.00	0.02	100

$$EVI_{2005}=0.387PC1_{2005}+0.227PC2_{2005}+0.128PC3_{2005}+0.067PC4_{2005}+0.056PC5_{2005}+0.041PC6_{2005}$$

$$EVI_{2010}=0.371PC1_{2010}+0.232PC2_{2010}+0.156PC3_{2010}+0.063PC4_{2010}+0.049PC5_{2010}+0.033PC6_{2010}$$

$$EVI_{2015}=0.374PC1_{2015}+0.230PC2_{2015}+0.126PC3_{2015}+0.067PC4_{2015}+0.062PC5_{2015}+0.041PC6_{2015}$$

$$EVI_{2018}=0.360PC1_{2018}+0.206PC2_{2018}+0.117PC3_{2018}+0.084PC4_{2018}+0.063PC5_{2018}+0.050PC6_{2018}$$

2.2　生态脆弱性分级标准

标准化处理EVI使其更加便于度量和比较。在EVI标准化基础上，参照国内外已有生态脆弱性评价标准[22-24]，并根据新疆生态环境特点，将生态敏感性指数、生态恢复力指数、生态压力度指数和生态脆弱性划分为5个等级(表5)，等级越大，程度越强。

2.3　生态脆弱等级面积转移矩阵

转移矩阵可定量描述系统状态间的转移，包含区域某个时期内生态脆弱性的静态数据和各个类型间相互转化的动态数据[25]。生态脆弱性转移矩阵的数学表达如下：

$$S_{ij}=\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1j} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2j} \\ \vdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ S_{i1} & S_{i2} & \cdots & S_{ij} \end{bmatrix}$$

式中：i表示转移前的生态脆弱类型；j表示转移后的生态脆弱类型；S_{ij}是i脆弱类型转为j脆弱类型的面

表5　SRP模型的生态脆弱性分级标准

Tab. 5　Ecological vulnerability classification standards of SRP model

等级	取值范围	敏感性	恢复力	压力度	脆弱性
1级	≤0.2	微度敏感	恢复力弱	生态压力小	微度脆弱
2级	0.2~0.4	轻度敏感	恢复力较弱	生态压力较小	轻度脆弱
3级	0.4~0.6	中度敏感	恢复力一般	生态压力中等	中度脆弱
4级	0.6~0.8	重度敏感	恢复力较强	生态压力较大	强度脆弱
5级	＞0.8	极度敏感	恢复力强	生态压力大	重度脆弱

积，矩阵中每一行元素代表j类生态脆弱类型转移前的生态脆弱类型信息。

2.4 生态脆弱性驱动力分析

由Wang等[26]提出的地理探测器是揭示空间分异性驱动因子的一种新方法。其中单因子探测模块利用因子解释力衡量自变量因子对因变量变化产生的贡献力大小，检验形成空间分异的原因是否为某个地理因素导致；因子交互探测模块[27]通过比较两个影响因子的单因子解释力之和及其交互作用的解释力，以判别交互后对地理现象的影响程度，在5种增强情况中非线性增强类型对生态脆弱性的变化具有最强影响作用。因子探测计算公式如下：

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2}\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2$$

式中：q为解释力，表示某因子在多大程度上解释了生态脆弱性的空间分布；$h=1, \cdots, L$为变量因子的分区数；N_h和N分别为分区h和全部区域的单元数；σ_h^2和σ^2分别是分区h和全局的生态脆弱强度方差。q的值域为[0, 1]，q值越大，说明对生态脆弱性空间分布影响越大。

通过因子探测和交互探测识别新疆生态脆弱性驱动因子及交互作用，以2000年和2018年生态脆弱性指数之差作为因变量，以相应原始指标体系之差作为自变量进行因子分析。结合王劲峰等[27]提出的数据离散化方法，对17个影响因子做离散化处理，利用自然间断点分级法将其分为5类，创建10 km×10 km的渔网格并提取样本点数据导入到地理探测器软件中，对新疆生态脆弱性空间变化的驱动力因子进行探测分析。

3 结果与分析

3.1 生态敏感性指数时空分布

为消除指标信息中的重叠和共线性，对标准化后的空间栅格数据采用空间主成分分析方法(SPCA)，计算生态敏感性、生态恢复力和生态压力度的指标权重(表6)。

生态敏感性指数中景观破碎度和土壤侵蚀程度所占权重比较大，说明受土地利用状况和地表状况变化影响较明显，其次高程、干燥度比重也较大；生态敏感性受土地利用状况、地形因子和气候因子综合影响。生态恢复力各指标权重植被覆盖度权重最大，贡献率均大于50%，对新疆的生态恢复方面有重要作用，但生境质量指数和景观恢复力指数对生态恢复的影响较大。生态压力度指数中农业依赖度、人均GDP和人口密度是影响新疆生态压力度的主要因素。

表6 生态脆弱性指数各指标权重

Tab. 6 Weights of indicators of ecological vulnerability

生态脆弱性指数	指标	权重
生态敏感性指数	高程	0.130
	坡度	0.033
	地形起伏度	0.073
	土地垦殖率	0.037
	景观破碎度	0.241
	土壤侵蚀程度	0.221
	干燥度	0.150
	年均降水量	0.045
	≥10 ℃积温	0.070
生态恢复力指数	植被覆盖度	0.574
	景观恢复力指数	0.184
	生境质量指数	0.142
生态压力度指数	人均耕地面积	0.035
	农业依赖度	0.323
	人均GDP	0.267
	人口密度	0.315
	第二产业比重	0.059

通过计算生态敏感性指数并进行分级，得到不同时期新疆生态敏感性空间分布(图2)。整体来看，新疆生态敏感性呈现中等敏感性面积增加，极端敏感性面积减少，说明新疆生态敏感程度逐步降低。2000—2018年5个时期南疆的敏感性整体上均高于北疆，主要以重度敏感为主。东疆的生态敏感性在2000年、2005年两个时期相对敏感性程度不太高，2010年、2015年两个时期生态敏感性由轻、中度上升到中度、重度，2018年又有所下降，北疆的生态敏感性除2010年有所增强外，其他年份在中度敏感等级以下。南疆南部喀拉昆仑山区域生态敏感性有所降低。2018年新疆生态敏感性整体呈南高北低的分布特征。

新疆生态敏感性的空间分布特征明显，在天山南北坡山区、伊犁谷地以及阿尔泰山、喀拉昆仑山山地降水量较大、干燥度小、景观破碎度小，植被覆盖度高，生态环境较好，故生态敏感性值较低。沙漠分布区及绿洲-荒漠交错区生态敏感性较高。高

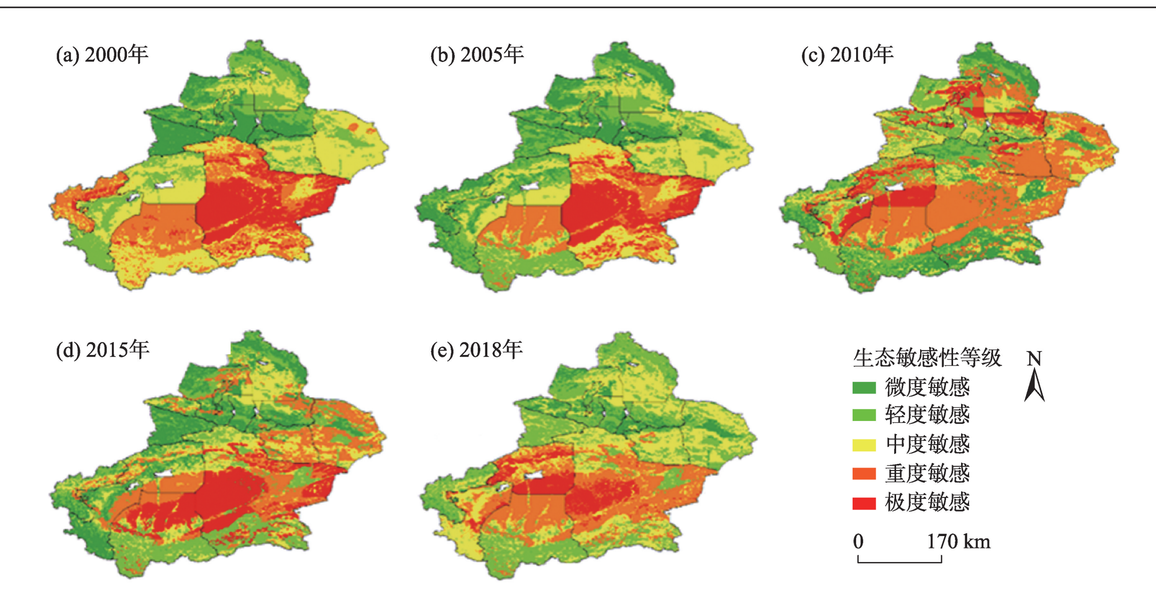


图2 生态敏感性空间格局分布

Fig. 2 Spatial pattern distribution of ecological sensitivity

度敏感区(包括极度敏感区和重度敏感区)主要分布在南疆,其气温较高,降水较少,且植被较为稀疏,土壤易受风蚀作用,自然条件比较恶劣,生态问题比较多。中度敏感区主要集中在东疆和北疆。低敏感区(包括轻度脆弱区和微度脆弱区)主要分布在阿尔泰山、天山、喀拉昆仑山一带,植被覆盖度较高、降水相对较多且极端高温天气较少,林地、草地生态系统较完整,生态系统功能较为稳定,抗干扰能力相对较强。地形、地貌决定着土壤质地以及水量分布状况,进而影响植被的生长和生态系统的稳定性[8,16],也是影响生态脆弱性的重要因素。

3.2 生态恢复力指数时空分布

计算生态恢复力指数并进行分级,得到2000—2018年5期不同等级生态恢复力的空间分布(图3)。2000—2018年新疆生态恢复力以1级为主,整体生态恢复力较弱,这是由新疆整体干旱脆弱的生态环境状况所决定。研究时段内,1级、4级和5级恢复力面积占比总体呈增加趋势,2级和3级恢复力占比下降。5级恢复力地区生态稳定性和抗干扰能力较好,生态恢复能力强,5级恢复力面积占比虽然最小,但呈逐年上升态势,2018年比2000年增加了126.70%,相对增幅最大,新疆生态恢复力逐步

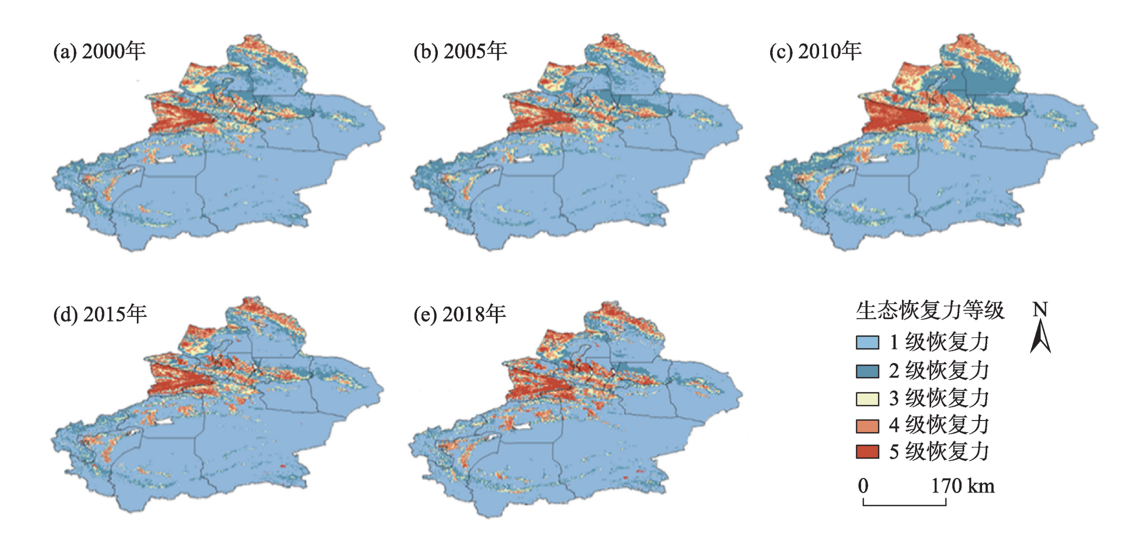


图3 新疆生态恢复力空间格局分布

Fig. 3 Spatial pattern of ecological resilience in Xinjiang

增强。

2000—2018年新疆生态恢复力的空间格局呈西北高东南低的整体分布格局，且其变化幅度较小，较为稳定，但生态恢复力强的区域呈零星增加趋势，新疆生态环境逐步改善，恢复力逐渐增强。新疆生态恢复力空间分布格局与植被覆盖度分布大致相似，植被覆盖度高，林草资源丰富，生物多样性高，生态恢复力强。生态恢复力较高区（5级、4级）主要集中在中部偏西的喇叭口（伊犁州直县市）；阿勒泰北部和塔城西北部生态恢复力也较高，2010年尤为明显，该地主要为山地森林、草原生态系统，生物多样性高，恢复能力较强。中度生态恢复区（2级、3级）分布较为零散，主要分布在高生态恢复力的周边以及昌吉州、哈密市中部、吐鲁番市、克州部分区域，基本为绿洲区，说明人类生态工程建设对生态恢复力影响明显。生态恢复力低值区分布面积最大，主要分布在阿克苏地区、和田地区、巴州、吐鲁番市和哈密市等区域，这些区域下垫面单一、植被少、生境质量指数低[8]，受外界干扰时耐受能力弱，恢复速度较慢。

3.3 生态压力度指数时空分布

由2000—2018年新疆生态压力度空间分布变化可知（图4），1级、3级和5级生态压力度呈下降趋势，2级和4级生态压力度总体呈上升趋势。其中，1级生态压力度面积占比最大，2000—2018年2级生态压力度增加明显。3级生态压力度呈波动小幅下降趋势。4级生态压力度面积占比仅次于1级，总体呈波动增加趋势，5级生态压力度面积占比相对较小，呈波动下降趋势。新疆生态压力度呈增加趋势，这与社会经济发展水平逐步提升有一定关系。

生态压力度高值区受干扰强，生态系统较不稳定。2000—2018年新疆生态压力度整体呈较低水平（1级），生态压力较低，这与新疆处于西部边疆，社会经济发展水平较低有一定关系。2000—2018年新疆生态压力度呈南、北部山区、中部绿洲区、山区偏高，东部、南部沙漠腹地低的空间分布格局，这与人类社会经济活动密切相关，社会经济活动强的区域生态压力较大，反之较低。生态压力度高值区主要分布在伊犁州直、阿勒泰北部、塔城西北部、乌鲁木齐市、昌吉州南部以及和田地区、喀什地区和巴州南部。2000—2010年新疆喀拉昆仑山生态压力度较高，2015—2018年有所缓解，这与逐步重视生态保护有一定关系。

3.4 生态脆弱性时空分布特征

3.4.1 新疆生态脆弱性时间变化　生态脆弱性是由生态敏感性、生态恢复力和生态压力度综合决定，2000—2018年新疆生态脆弱性整体处于中度脆弱以上，这与新疆生态敏感性较高，生态恢复力弱、生态压力大密切相关。

从图5可以看出，2010—2018年北疆生态脆弱性有所加重，尤其是阿勒泰、塔城南部变化较为显著，其他地方相对稳定，这与阿勒泰、塔城地区为重要的农牧区，生态压力较大有一定关系。新疆生态脆弱性分布大致呈西北、中部的山区、绿洲区低，东

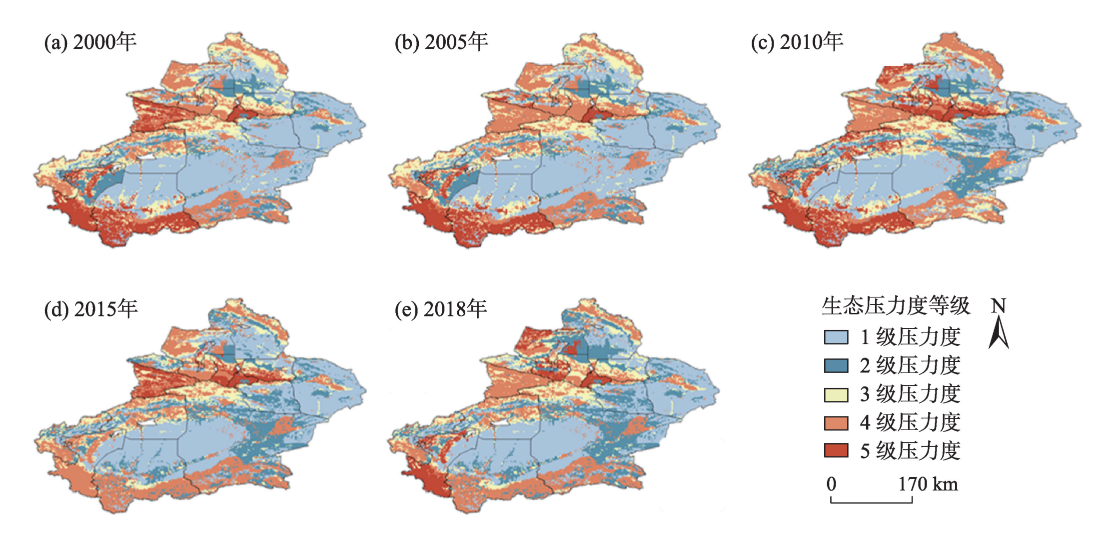


图4　新疆生态压力度空间格局分布

Fig. 4　Spatial pattern of ecological stress in Xinjiang

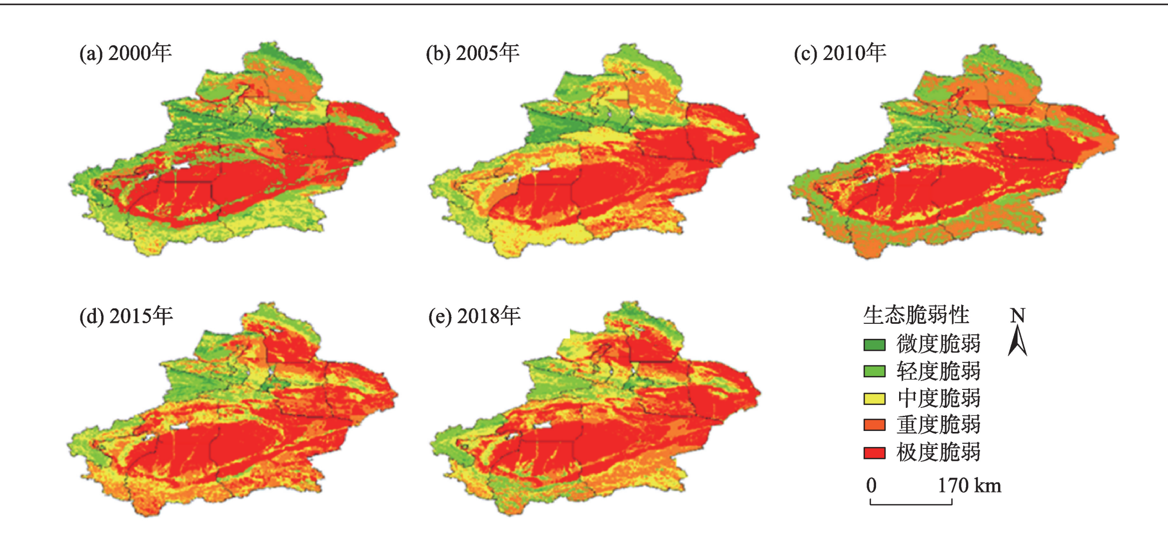


图5　新疆生态脆弱性空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of ecological vulnerability in Xinjiang

南部的荒漠区高的空间分布特征。高脆弱区主要分布在巴州中部、和田地区和喀什地区北部、阿克苏地区南部、吐鲁番市和哈密市南部、阿勒泰南部和塔城地区东部等地,这些地区受古尔班通古特沙漠和塔克拉玛干沙漠的影响较大,吐哈盆地分布着面积广大的戈壁,又处于风口位置,风力侵蚀强,生态脆弱性也较高;中度脆弱区分布较为零散,主要分布在沙漠周边的绿洲地带,人为干扰强、生态压力较大;低脆弱区集中在伊犁州直县市、塔城地区西部、阿勒泰地区北部、昌吉回族自治州等地区。

新疆的生态脆弱性主要受生态敏感性和生态压力度影响较大,植被覆盖度低、降水少、干燥度高的地区生态脆弱性较高,中部高海拔林地草地生物多样性丰富、生态系统较为稳定,生态脆弱性相对较低;生态脆弱性的空间分布与水资源分布密切相关[15,21]。东南部荒漠区为全疆的3个少雨中心,区内沙漠、戈壁广泛分布,风力作用强烈,荒漠化问题严重[4,15,28],脆弱性高。南疆昆仑山沿线海拔较高,且植被盖度较低,区域生态脆弱性也较高。在水资源条件较好的绿洲区,人类活动则成为影响脆弱性的主导因素[15-16]。

3.4.2　新疆生态脆弱性转化特征　根据转移矩阵公式建立2000和2018新疆生态脆弱不同等级转移矩阵(表7),发现不同等级之间的转化较为显著,尤其是相邻等级。微度脆弱区主要向轻度脆弱区转化;轻度脆弱区既有负向也有正向转化,向微度脆弱区转换的比例较大;中度脆弱区约有30.13%向轻度脆弱区转化,有21.92%和9.07%的区域向重度脆弱区和极度脆弱区转化;重度脆弱区主要向极度脆弱区和中度脆弱区转化,转化比例相差不大,而极度脆弱区面积增加主要来源于重度脆弱区。极度脆弱区中有42.81%向重度脆弱区转变,是重度脆弱区面积增加的主要来源之一,重度脆弱区和极度脆弱区之间转换较大,重度脆弱区面积增加主要来自于极度脆弱区和中度脆弱区的转化。

3.4.3　生态脆弱性综合指数变化　由新疆生态脆弱性综合指数变化可知(图6),2000—2018年生态脆弱性综合指数呈先增长后降低的趋势,最高值出现

表7　新疆脆弱区面积转移矩阵

Tab. 7　Area transfer matrix of fragile areas in Xinjiang　/km^2

	脆弱等级	2018年				
		微度脆弱	轻度脆弱	中度脆弱	重度脆弱	极度脆弱
2000年	微度脆弱	36117.16	12027.91	5579.62	200.47	0.00
	轻度脆弱	91913.32	105010.38	62277.87	35148.24	2973.57
	中度脆弱	41128.79	115768.69	108251.23	84228.82	34847.54
	重度脆弱	5846.90	38589.56	80587.03	127295.40	88137.89
	极度脆弱	601.40	5212.10	26795.52	246505.43	296655.16

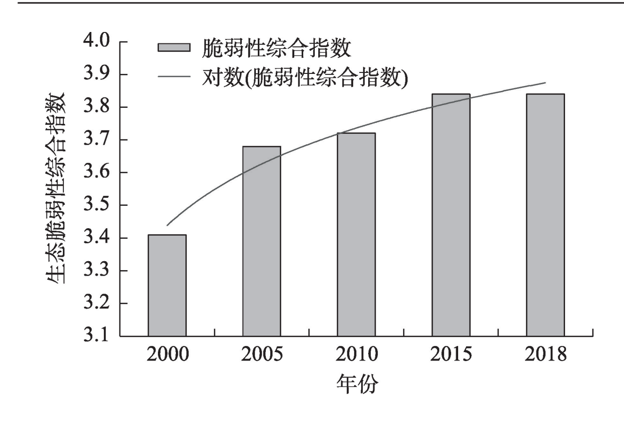


图6 新疆生态脆弱性综合指数变化

Fig. 6 Vulnerability index changes in Xinjiang

在2015年(3.84)。其中,2000—2005年生态脆弱性综合指数上升幅度最大,2005年以后增速放缓,趋于稳定,说明过去18 a间新疆生态环境整体情况正在逐步改善,但还需继续加强生态保护。

3.5 生态脆弱性变化驱动力分析

3.5.1 单因子探测分析 地理探测器单因子通过影响力q值来表示各指标对生态脆弱性变化的解释程度大小,探测结果显示q值由大到小依次为农业依赖度(0.347)、生境质量指数(0.294)、景观破碎度(0.290)、景观恢复力指数(0.279)、人口密度(0.272)、年均降水量(0.245)、土地垦殖率(0.231)、人均耕地面积(0.069)、第二产业比重(0.063)、土壤侵蚀程度(0.035)、高程(0.035)、人均GDP(0.027)、地形起伏度(0.013)、植被覆盖度(0.010)、≥10 ℃积温(0.010)、坡度(0.008)、干燥度(0.005),其他因子的q值很小,忽略不计。

从影响力q值来看,说明对农业的依赖程度以及生境质量对生态脆弱性的影响相对较大。人为活动因素(农业依赖度、人口密度、土地垦殖率)和自然环境因素(生境质量指数、景观破碎度、景观恢复力指数和年均降水量)的7个因子对新疆2000—2018年生态脆弱性变化的解释程度相对较大,其他因子对新疆生态脆弱性变化的解释程度则相对较低。

3.5.2 多因子交互性探测分析 生态脆弱性变化通常是社会因子、植被因子、地表因子、地形因子和气象因子等多方面因素共同作用的结果,没有单一决定因子能解释新疆生态脆弱性变化,说明生态系统变化的复杂性。采用地理探测器得到24个非线性增强因子(表8)。

农业依赖度和景观破碎度交互作用对新疆生态脆弱性变化具有最强的解释作用,同时农业依赖度和生境质量指数、植被覆盖度、景观恢复力及土地垦殖率的相互协同下也表现出较强的影响力。单因子探测结果显示农业依赖度对新疆生态脆弱性变化影响较大,其与景观破碎度指数和生境质量指数相结合时,有了更大的影响力。在两两交互作用中,生境质量指数、景观恢复力、景观破碎度、植被覆盖度与区域人类活动相互作用是新疆生态脆弱性变化主要驱动力。

4 讨 论

评价结果是相对的,生态脆弱性评价分析,受指标选取、评价方法选择等多种因素的影响。景观破碎度和土壤侵蚀程度是敏感度权重占比较大的

表8 主要指标之间交互作用

Tab. 8 Interaction between key indicators

交互类型	q值	交互类型	q值
农业依赖度∩景观恢复力	0.325	景观破碎度∩生境质量指数	0.270
农业依赖度∩景观破碎度	0.455	景观破碎度∩植被覆盖度	0.246
农业依赖度∩生境质量指数	0.446	景观破碎度∩人口密度	0.308
农业依赖度∩植被覆盖度	0.333	景观破碎度∩土地垦殖率	0.110
农业依赖度∩年均降水量	0.114	生境质量指数∩植被覆盖度	0.322
农业依赖度∩土地垦殖率	0.276	生境质量指数∩人口密度	0.114
农业依赖度∩高程	0.057	生境质量指数∩土地垦殖率	0.257
景观恢复力∩景观破碎度	0.172	第二产业比重∩年均降水量	0.119
景观恢复力∩生境质量指数	0.453	植被覆盖度∩人口密度	0.279
景观恢复力∩植被覆盖度	0.295	植被覆盖度∩土地垦殖率	0.323
景观恢复力∩人口密度	0.361	人均GDP∩年均降水量	0.113
景观恢复力∩土地垦殖率	0.124	人口密度∩土地垦殖率	0.090

两个指标，继而是高程、干燥度和地形起伏。相近的自然条件下，人类活动对景观破碎度变化产生较大影响，因此，不同地区敏感性主要受人为因素影响。城镇等生活空间由于扩张会占用土地，建设工程、矿产资源开发等人为因素会增加生态环境的敏感性，这与黄莹等[28]、郭亚淑等[29]和艾丽娅等[30]的研究结果相一致。通过对新疆生态压力度的指标权重和空间变化分析，发现人口的增长对城镇发展压力较大，进而使生态系统承受的压力不断增大，这与黄莹等[28]和于琳[31]的研究结果相一致。近年来，新疆经济快速发展，人均GDP迅速增加，但同时使生态环境压力增大。先天恶劣的自然环境本底，导致新疆土壤侵蚀强度大、植被覆盖率低、生境质量指数小，导致生态敏感性高而恢复力弱，生态脆弱性较高[32-34]。根据新疆生态脆弱性评价及驱动力分析结果，生态脆弱性5个等级的时空分布范围、主要生态问题不尽相同，因此，生态保护与建设对策也理应有所不同。

5　结　论

气候变化和人类活动双重作用下，干旱荒漠区生态系统正在发生较大变化，利用空间主成分分析方法构建新疆敏感性、恢复力、压力度和生态脆弱性评价模型，分析其时空分布特征及驱动力，主要得出结论如下：

（1）2000—2018年景观破碎度和土壤侵蚀程度是影响新疆生态敏感性的主要因素，整体处于中度敏感水平，东南高西北低；新疆生态恢复力主要受植被覆盖度影响，处于较低状态，呈西北高东南低，且其变化幅度小而稳定；新疆生态压力度指数主要为人均GDP、农业依赖度和人口密度，呈南、北部的山区和中部高，东南低。

（2）2000—2018年新疆生态脆弱性介于中度脆弱和重度脆弱之间。南、北疆植被覆盖度低、降水少、干燥度高的地区生态脆弱强度较高，中部以林地、草地为主的高海拔地区的生物多样性丰富、生态系统较为稳定，生态脆弱性强度相对较低。

（3）2000—2018年新疆不同脆弱等级间转化明显，相邻脆弱性等级转化明显，生态脆弱性呈现先增长后降低的趋势，过去18 a间新疆整体生态环境情况逐渐好转。

（4）人为活动因子中的农业依赖度、人口密度、土地垦殖率，及自然环境因子中的生境质量指数、景观破碎度、景观恢复力指数和年均降水量7个因子对新疆生态脆弱性变化的影响较大。生境质量指数、景观恢复力指数、景观破碎度指数、植被覆盖率的变化与区域人类活动的相互作用是促使新疆生态脆弱性的主要驱动力。

参考文献(References)：

[1] Turvey R. Vulnerability assessment of developing countries: The case of small island developing states[J]. Development Policy Review, 2007, 25(2): 243-264.

[2] Mahapatra M, Ramakrishnan R, Rajawat A S. Coastal vulnerability assessment using analytical hierarchical process for South Gujarat coast, India[J]. Natural Hazards, 2015, 76(1): 139-159.

[3] 曹诗颂, 王艳慧, 段福洲, 等. 中国贫困地区生态环境脆弱性与经济贫困的耦合关系——基于连片特困区714个贫困县的实证分析[J]. 应用生态学报, 2016, 27(8): 2614-2622. [Cao Shisong, Wang Yanhui, Duan Fuzhou, et al. Coupling between ecological China: Empirical analysis vulnerability and economic poverty in contiguous destitute areas of 714 poverty-stricken counties[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(8): 2614-2622.]

[4] 王贝贝, 丁明军, 管琪卉, 等. 基于格网的南昌市生态环境脆弱性评价[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5460-5472. [Wang Beibei, Ding Mingjun, Guan Qihui, et al. Gridded assessment of eco-environmental vulnerability in Nanchang city[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5460-5472.]

[5] 王让会, 樊自立. 干旱区内陆河流域生态脆弱性评价——以新疆塔里木河流域为例[J]. 生态学杂志, 2001, 20(3): 63-68. [Wang Ranghui, Fan Zili. Ecological fragility assessment on continental river basin in arid zone taking Tarim River basin, Xinjiang as an example[J]. Chinese Journal of Ecology, 2001, 20(3): 63-68.]

[6] 谢霞, 王宏卫. 艾比湖区域生态脆弱性评估与保护[J]. 新疆农业科学, 2012, 49(3): 531-536. [Xie Xia, Wang Hongwei, Eco-environmental vulnerability evaluation and countermeasures in Ebinur lake region[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2012, 49(3): 531-536.]

[7] 万洪秀, 孙占东, 王润. 博斯腾湖湿地生态脆弱性评价研究[J]. 干旱区地理, 2006, 29(2): 248-254. [Wan Hongxiu, Sun Zhandong, Wang Run. Study on the evaluation of ecological frangibility of the wetlands in the Bosten Lake region[J]. Arid Land Geography, 2006, 29(2): 248-254.]

[8] 师庆东, 王智, 贺龙梅, 等. 基于气候、地貌、生态系统的景观分类体系——以新疆地区为例[J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3359-3367. [Shi Qingdong, Wang Zhi, He Longmei, et al. Landscape classification system based on climate, landform, ecosystem: A case study of Xinjiang area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(12): 3359-3367.]

[9] 张宁宁, 房世峰, 杜加强, 等. 基于LUCC的新疆沙尘源空间格局及转化机理分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(5): 1053-1063. [Zhang Ningning, Fang Shifeng, Du Jiaqiang, et al. Transformation and spatio-temporal distribution of sand-dust sources in Xinjiang

based on LUCC[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(5): 1053-1063.]

[10] 郭兵, 孔维华, 姜琳. 西北干旱荒漠生态区脆弱性动态监测及驱动因子定量分析[J]. 自然资源学报, 2018, 33(3): 412-424. [Guo Bing, Kong Weihua, Jiang Lin. Dynamic monitoring of ecological vulnerability in arid desert ecological region of Northwest China and the quantitative analysis of its driving forces[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(3): 412-424.]

[11] 新疆维吾尔自治区统计局. 国家统计局新疆调查总队. 新疆维吾尔自治区2018年国民经济和社会发展统计公报[N]. 新疆日报, 2019-03-22. [Statistics Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Xinjiang Survey Team National Bureau of Statistics. Statistical Communique of National Economic and Social Development in Xinjiang Uygur Autonomous Region in 2018[N]. Xinjiang Daily, 2019-03-22.]

[12] 张启. 长白山地区土地利用/覆被变化对生态环境脆弱性的影响评价[D]. 延吉: 延边大学, 2019. [Zhang Qi. The Impact Assessment of Ecological Enviorment Vulnerability Based on Land Use/Cover Change in Changbai Mountain Area[D]. Yanji: Yanbian University, 2019.]

[13] 马骏. 三峡库区重庆段生态脆弱性动态评价[D]. 重庆: 西南大学, 2014. [Ma Jun. Dynamic Evaluation of Ecological Vulnerability in the Three Gorges Reservoir Region in Chongqing Section, China[D]. Chongqing: Southwest University, 2014.]

[14] 刘正佳, 于兴修, 李蕾, 等. 基于SRP概念模型的沂蒙山区生态环境脆弱性评价[J]. 应用生态学报, 2011, 22(8): 2084-2090. [Liu Zhengjia, Yu Xingxiu, Li Lei, et al. Spatio-temporal change of ecological vulnerability in Yimeng Mountain based on SRP model and driving force analysis[J]. Journal of Applied Ecology, 2011, 22(8): 2084-2090.]

[15] 韦晶, 郭亚敏, 孙林, 等. 三江源地区生态环境脆弱性评价[J]. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1968-1975. [Wei Jing, Guo Yamin, Sun Lin, et al. Evaluation of ecological environment vulnerability in the Three-River Source region[J]. Journal of Ecology, 2015, 34(7): 1968-1975.]

[16] 张行, 陈海, 史琴琴, 等. 陕西省景观生态脆弱性时空演变及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 496-505. [Zhang Hang, Chen Hai, Shi Qinqin, et al. Spatio-temporal evolution and driving factors of landscape ecological vulnerability in Shaanxi Province[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 496-505.]

[17] Zang Z, Zou X, Zuo P, et al. Impact of landscape patterns on ecological vulnerability and ecosystem service values: An empirical analysis of Yancheng Nature Reserve in China[J]. Ecological Indicators, 2017, 72: 142-152.

[18] 杨海娟, 温晓金, 刘焱序, 等. 秦岭土石山区土地利用程度对生态恢复力的影响评价[J]. 水土保持通报, 2012, 32(4): 261-266. [Yang Haijuan, Wen Xiaojin, Liu Yanxu, et al. Impact evaluation of land use degree on ecological resilience in Qinling earth-rock mountainous area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(4): 261-266.]

[19] 王俊, 杨新军, 刘文兆. 半干旱区社会-生态系统干旱恢复力的定量化研究[J]. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1385-1390. [Wang Jun, Yang Xinjun, Liu Wenzhao. Quantitative research on drought resilience of social-ecosystem in semi-arid area[J]. Progress in Geography, 2010, 29(11): 1385-1390.]

[20] 赵先贵, 马彩虹, 高利峰, 等. 基于生态压力指数的不同尺度区域生态安全评价[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(6): 135-138. [Zhao Xiangui, Ma Caihong, Gao Lifeng, et al. Evaluation of regional ecological security at different ccales based on ecological pressure index[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(6): 135-138.]

[21] 姚雄, 余坤勇, 刘健, 等. 南方水土流失严重区的生态脆弱性时空演变[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 735-745. [Yao Xiong, Yu Kunyong, Liu Jian, et al. Temporal and spatial evolution of ecological vulnerability in the severe soil erosion area in south China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3): 735-745.]

[22] Fatemi F, Ardalan A, Aguirre B, et al. Social vulnerability indicator in disasters: Fingdings from a systematic review[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2017, 22: 219-227.

[23] 王钰, 胡宝清. 西江流域生态脆弱性时空分异及其驱动机制研究[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(7): 947-956. [Wang Yu, Hu Baoqing. Study on the spatial and temporal differentiation of ecological vulnerability in Xijiang River basin and its driving mechanism[J]. Journal of Geo-information Science, 2018, 20(7): 947-956.]

[24] 付刚, 白加德, 齐月, 等. 基于GIS的北京市生态脆弱性评价[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(9): 830-839. [Fu Gang, Bai Jiade, Qi Yue, et al. Evaluation of ecological vulnerability in Beijing based on GIS[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(9): 830-839.]

[25] 张德君, 高航, 杨俊, 等. 基于GIS的南四湖湿地生态脆弱性评价[J]. 资源科学, 2014, 36(4): 874-882. [Zhang Dejun, Gao Hang, Yang Jun, et al. Evaluation of ecological vulnerability of Nansi lake wetland based on GIS[J]. Resources Science, 2014, 36(4): 874-882.]

[26] Wang J F, LI X H. Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.

[27] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. [Wang Jinfeng, Xu Chendong. Geodetector: Principles and prospects[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.]

[28] 黄莹, 包安明, 刘海隆, 等. 基于景观格局的新疆生态脆弱性综合评价研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 261-266. [Huang Ying, Bao Anming, Liu Hailong, et al. Research on comprehensive evaluation of Xinjiang ecological vulnerability based on landscape pattern[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(3): 261-266.]

[29] 郭亚淑. 福州市土地利用/覆被变化对生态环境脆弱性的影响评价[D]. 福州: 福建农林大学, 2016. [Guo Yashu. The Impact Assessment of Eco-environment Based on Land Use/Cover Change in Fuzhou City[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry Uni-

versity, 2016.]

[30] 艾丽娅, 王少军, 张志. 1977—2017年锡林郭勒盟中部草原植被覆盖时空演变及预测[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 249–256, 277, 347. [Ai Liya, Wang Shaojun, Zhang Zhi. Spatio-temporal evolution and prediction of grassland vegetation coverage in central Xilin Gol League from 1977 to 2017[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 249–256, 277, 347.]

[31] 于琳. 新疆绿洲生态经济系统可持续发展研究[D]. 重庆: 西南大学, 2006. [Yu Lin. Research on Sustainable Development of Xinjiang Oasis Eco-economy System[D]. Chongqing: Southwest University, 2006.]

[32] 鲁大铭, 石育中, 李文龙, 等. 西北地区县域脆弱性时空格局演变[J]. 地理科学进展, 2017, 36(4): 404–415. [Lu Daming, Shi Yuzhong, Li Wenlong, et al. Spatio-temporal change of vulnerability in counties of Northwest China[J]. Progress in Geography, 2017, 36(4): 404–415.]

[33] 茹克亚·萨吾提, 阿不都艾尼·阿不里, 李虎, 等. 基于遥感生态指数模型的阜康市生态环境动态变化监测与评价[J]. 水土保持研究, 2020, 27(1): 283–289, 297. [Rukeya Sawuti, Abuduaini Abuli, Li Hu, et al. Dynamic monitoring and analysis fukang city based ecological environment in RSEI model[J]. Research of Soil and Water Conscrvation, 2020, 27(1): 283–289, 297.]

[34] Pei H, Fang S F, Lin L, et al. Methods and applications for ecological vulnerability evaluation in a hyper-arid oasis: A case study of the Turpan Oasis, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(2): 1449–1461.

Spatio-temporal variation of ecological vulnerability in Xinjiang and driving force analysis

SUN Guili[1,2], LU Haiyan[1], ZHENG Jiaxiang[1], LIU Yanyan[1], RAN Yajun[1]

(1. College of Forestry and Landscape Architecture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China;
2. Key Laboratory of Forestry Ecology and Industrial Technology in Arid Areas, Urumqi 830052, Xinjiang, China)

Abstract: Ecological vulnerability assessment is an important way to understand regional ecological conditions. There are great significance for regional ecological protection and construction. This study establishes ecological vulnerability evaluation index system based on the SRP model, analyze the spatial and temporal distribution characteristics and driving forces of ecological vulnerability in Xinjiang from 2000 to 2018. The main conclusions are as follows: (1) From 2000 to 2018, the ecological sensitivity index was generally at moderate sensitivity, showing high in the southeast and low in the northwest, and it was greatly affected by landscape fragmentation and soil erosion. The ecological resilience index was mainly affected by vegetation coverage, high in northwest and low in southeast, and it was relatively stable, mainly low-recovery states. The ecological stress index was mainly influenced by per capita GDP, agricultural dependence, and population density. It was high in the northern, southern mountainous areas and central Oasis and mountainous, and low in the southeast. (2) Ecological vulnerability was overall moderate to severely fragile level from 2000 to 2018 in Xinjiang. In north and south of Xinjiang, there are low vegetation coverage, low rainfall, and high aridity, so higher ecological fragility was observed. In contrast, the high-altitude areas dominated by woodlands and grasslands in central area are rich in biodiversity, and so ecological vulnerability was relatively low. Overall, the comprehensive index of ecological vulnerability showed an initial increasing trend, followed by a decrease. (3) Drivers of ecological vulnerability in Xinjiang, agricultural dependence, population density, and land reclamation rate of anthropogenic factors and habitat quality index, landscape fragmentation, landscape resilience index, and annual average precipitation of natural environmental factors are mainly single factors. The interaction of these factors, including habitat quality index, landscape resilience index, landscape fragmentation index, vegetation coverage, and regional human activities are the main driving forces.

Keywords: SRP model; ecological vulnerability; spatiotemporal distribution; driving force; Xinjiang